

环境适应性设计与分析

基于剪切增稠液体的变阻尼隔振器 动力学特性研究

余慕春¹, 李炳蔚¹, 牛智玲¹, 薛伟康¹, 赵鹏²

(1.中国运载火箭技术研究院, 北京 100076; 2.南京航空航天大学 机械结构力学及控制国家重点实验室, 南京 210016)

摘要: **目的** 研究一种具有变阻尼特性的剪切增稠液体 (STF) 隔振器。**方法** 首先采用二氧化硅纳米颗粒和聚乙二醇 200 为工作介质合成剪切增稠液体, 通过试验研究剪切增稠液体的流变特性。之后以剪切增稠液体为工作介质, 设计一种活塞液压式减振增稠液体隔振器, 建立隔振器的动力学模型, 并通过数值仿真研究了该隔振器的减振性能; 最后, 研究剪切增稠液体隔振器隔振性能影响因素。**结果** 当远离共振频率时, 隔振器具有小阻尼特性; 在共振区附近, 由于剪切增稠效应, 隔振器阻尼骤然增加, 实现对共振峰的有效抑制。**结论** 剪切增稠液隔振器可有效抑制共振峰, 同时不会对高频隔振性能产生不利影响, 有效解决了传统隔振器线性阻尼的固有缺点。

关键词: 剪切增稠液体; 非线性阻尼; 隔振

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2019.08.007

中图分类号: TU112.5 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2019)08-0033-06

Dynamical Properties of Variable-damped Vibration Isolator Based on Shear Thickening Fluid

YU Mu-chun¹, LI Bing-wei¹, NIU Zhi-ling¹, XUE Wei-kang¹, ZHAO Peng²

(1. China Academy of Launch Vehicle Technology, Beijing 100076, China; 2. State Key Laboratory of Mechanics and Control of Mechanical Structure, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

ABSTRACT: Objective To research on a variable-damped isolator named shear thickening fluid (STF) vibration isolator. **Methods** Firstly, STF was prepared by dispersing nano-particles of silica into polyethylene glycol 200 fluid, followed by rheological properties test of shear thickening fluid. After that, an STF isolator was designed with STF as working medium. The vibration isolation system supported by STF isolator was modeled and the numerical simulation was conducted to study the vibration isolation properties of STF. And finally, the effect factors on vibrations isolation performance was researched quantitatively. **Results** STF isolator had small damping property under high vibration frequency. However, because of the shear thickening effect, it exhibited very strong damping at resonance frequency with the increase of shearing rate. So this special inherent character for STF vibration isolator was very effective for restraining resonance. **Conclusion** STF vibration isolator can effectively restrain resonance without bringing unfavorable effect at high frequency and effectively resolves the problem of traditional isolators.

收稿日期: 2010-02-09; 修订日期: 2019-03-02

基金项目: 装发预研领域基金 (6140210010511)

作者简介: 余慕春 (1989—), 男, 江苏徐州人, 博士, 主要研究方向为装备环境适应性。

KEY WORDS: shear thickening fluid; nonlinear damper; vibration isolation

工程上常采用隔振器来降低设备承受的振动量级,以提升其环境适应性。阻尼是隔振器的重要特征参数之一,当激励频率接近系统固有频率时,会引起系统共振,对于线性隔振系统,隔振器阻尼越大,对共振抑制的效果越好。然而,当激励频率大于 $\sqrt{2}$ 倍固有频率时,阻尼将对隔振性能带来不利影响。因此,线性隔振系统对隔振器阻尼的选择存在固有矛盾,隔振器阻尼一般需要折中考虑。

为了兼顾共振区和减振器的性能,学者们开展了大量的研究工作。部分学者通过磁流变阻尼器控制阻尼力,从而实现全频带的减振性能^[1-2]。Lang等人研究了三次非线性阻尼对减振性能的影响,并采用磁流变阻尼器实现三次非线性阻尼特性,从而实现了对共振峰的抑制同时降低阻尼对高频区隔振性能的影响^[3-5]。李方硕建立了半主动隔振系统,通过控制开关闭合实现减振器阻尼和刚度的切换,从而实现变刚度、变阻尼特性^[6-7]。季馨等针对现有隔振系统的不足,设计了一种无谐振峰隔振缓冲器,利用帽盖与阻尼簧的接触摩擦产生阻尼,通过控制阻尼簧的几何外形,使得阻尼随着振动幅值的增大而增加,从而获得变阻尼特性,并实现无谐振峰隔振^[8-9]。然而,在工程中,磁流变阻尼器等半主动控制方法由于需要额外能源、系统复杂、可靠性低等原因应用并不广泛,而无谐振峰隔振缓冲器由于结构较复杂、成本较高等原因,依然没有得到大规模推广。

剪切增稠液体(Shear Thickening Fluid, STF)是一种新型功能材料,这一材料是由纳米颗粒的分散相(如硅胶颗粒)和分散介质(如乙二醇、聚乙二醇)混合形成的悬浮液体,它在低剪切速率下非常容易变形,可像液体一样缓慢流动。在受到高速剪切时,一旦剪切速率达到临界速率,其表观黏度发生大幅度增大而变黏稠,甚至由液态转化为类固体^[10-11]。近年来,随着安全防护日益增长的需要,具有优异的能量衰减能力的STF作为方便实用的防护材料引起高度重视,正逐步应用于人体防护、吸能减振等领域^[13-16]。利用STF剪切增稠的特性,文中设计了一种新型具有非线性阻尼特性的隔振器,当远离共振频率时,由于剪切速率减小,隔振器具有小阻尼特性;在共振区附近,由于剪切速度增大,隔振器阻尼骤然增加,实现对共振峰的有效抑制。

文中首先通过实验研究了一类以二氧化硅纳米颗粒和聚乙二醇200为工作介质的STF的流变特性。之后以STF为工作介质,设计了一种活塞液压式STF隔振器,并建立了隔振器的动力学模型。最后,通过数值仿真研究了该隔振器的减振性能,并探究了影响隔振器减振性能的关键因素。

1 STF流变性能

采用二氧化硅颗粒作为分散相,采用聚乙二醇作为分散介质合成了STF,如图1所示。将少量二氧化硅颗粒添加到聚乙二醇中,利用电动搅拌器进行研磨,边研磨边继续添加二氧化硅颗粒,直至达到所需的质量分数。充分研磨24 h后,将混合样品进行抽真空处理。采用的二氧化硅颗粒直径为180~220 nm,共获得了二氧化硅颗粒的质量分数为28%、32%、35%三种STF。



图1 STF(二氧化硅纳米颗粒的质量分数35%)

作为一种非牛顿流体,STF的剪切增稠效应主要通过其流变性能来表征。STF的流变特性给出了其黏度随剪切速率变化的关系,其中黏度由剪切速率和剪切应力的比值确定。文中采用Physica MCR301型流变仪在室温条件下测得了STF流变性能(如图2所示),测试采用锥板夹具,锥角为 2.007° ,平板直径为24.967 mm。



图2 MCR 301型流变仪

不同质量分数下,STF的稳态流变特性曲线如图3所示。可以看出,三类样品呈现同一流变趋势。当剪切速率较低时,STF呈现出轻微剪切变稀行为,表观黏度随剪切速率的增大而略有降低。当剪切速率增加到一个临界值后,表观黏度出现急剧的变化,剪切增稠现象发生。随着剪切速率的进一步增加,表观黏

度在经过一个最大值后有所降低。此外，随着分散相质量分数不断增加，STF 发生流变转化的临界剪切速率会逐渐减小，所能达到的最大黏度值也有所提高。

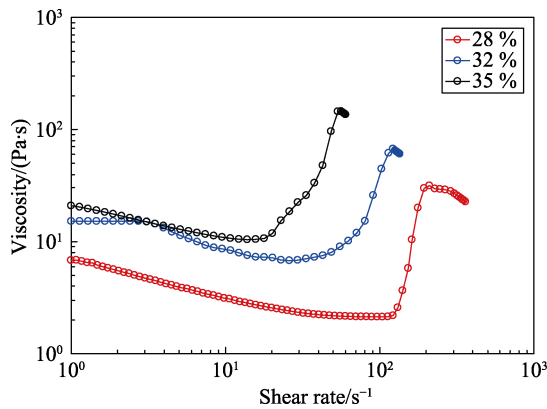


图 3 不同质量分数 STF 的稳态流变特性

2 STF 隔振器的动力学模型

2.1 STF 隔振器结构设计

为利用剪切增稠特性实现减振，设计了一种 STF 隔振器，由活塞、缸体、弹簧和后端盖等组成，如图 4 所示。当活塞端部法兰处受到外界振动激励时，活塞往复运动使刚体内 STF 受到剪切应力作用，同时弹簧受到压缩提供弹性力。当振动幅值较小时，剪切速度低于临界速率，STF 隔振器阻尼较小；当振动使得剪切速率超过临界速率时，STF 隔振器阻尼急剧增大，实现对振动或冲击峰值的抑制。因此，STF 隔振器在隔振频率区具有小阻尼特性，而在接近共振时具有大阻尼特性，具有变阻尼特性，从而实现在对共振峰有效抑制的同时不影响隔振频率区的隔振性能，具有理想的减振性能。

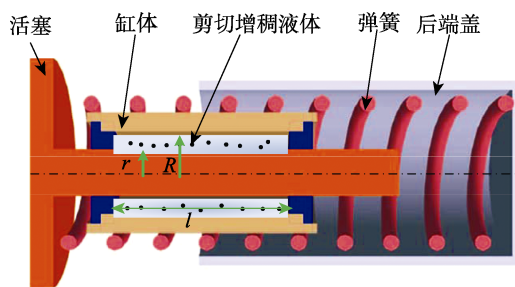


图 4 STF 隔振器

2.2 STF 隔振器力学模型

图 4 中减振增稠液体隔振器活塞直径为 r ，缸体内径为 R ，腔体内部长度为 l 。剪切速率为：

$$\dot{\gamma} = \frac{\dot{x}}{R-r} \quad (1)$$

式中： $\dot{\gamma}$ 为剪切速率； \dot{x} 为活塞运动的速度。

当活塞运动时，其受到的阻尼力为：

$$F_f = \tau \cdot 2\pi r \cdot l \quad (2)$$

式中： F_f 是阻尼力； τ 为切应力。

STF 的黏度可以表示为剪切应变和剪切速率的比值，即：

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (3)$$

式中： η 为黏度。因此阻尼力可以表示为：

$$F_f = \eta \frac{2\pi r l}{R-r} \dot{x} \quad (4)$$

采用图 4 所示 STF 隔振器建立隔振系统如图 5 所示，其中 k 和 c 分别为 STF 隔振器的刚度和阻尼。

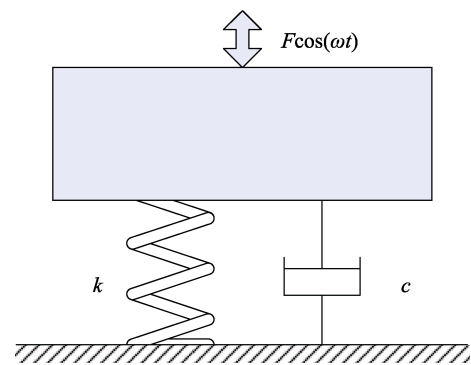


图 5 STF 隔振系统

设 STF 临界剪切速率对应的活塞速度为 v_0 ，由 STF 所引起的阻尼力可以写为：

$$\begin{cases} F_{f1} = \eta_1 \cdot \frac{2\pi r l}{R-r} \cdot \dot{x} & (\dot{x} < v_0) \\ F_{f2} = \eta_2 \cdot \frac{2\pi r l}{R-r} \cdot \dot{x} & (\dot{x} \geq v_0) \end{cases} \quad (5)$$

式中： η_1 是剪切变稀段的黏度； η_2 是剪切增稠段的黏度。因此，包含变阻尼项的动力学方程可以简化为：

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = f \cos(\omega t) \quad (6)$$

其中

$$\begin{cases} c = c_1 = \eta_1 \cdot \frac{2\pi r l}{R-r} & (\dot{x} < v_0) \\ c = c_2 = \eta_2 \cdot \frac{2\pi r l}{R-r} & (\dot{x} \geq v_0) \end{cases} \quad (7)$$

为简化方程和推导过程，可忽略轻微的剪切变稀现象，即认为 η_1 和 η_2 均为常量。

3 减振增稠液体隔振器隔振性能研究

3.1 STF 隔振器动力学特性

对于图 4 所示的 STF 隔振器，其结构参数见表 1。对三种 STF 的流变特性进行分析，可得不同质量分数 STF 剪切变稀段、增稠段的黏度，见表 2。

表 1 STF 隔振器结构参数

参数	R/mm	r/mm	l/mm	K/(N·m ⁻¹)
数值	24	20	100	10 ⁶

表 2 STF 性能参数

材料(质量分数)/%	剪切变稀段黏度 η_1 /(Pa·s)	剪切增稠段黏度 η_2 /(Pa·s)	临界剪切速率 $\dot{\gamma}$ /s ⁻¹
28	3	31	160
32	10	67	90
35	12	144	42

考虑表 1 中减振器的结构参数,可以得到采用以上三种质量分数的 STF 得到的隔振器剪切变稀段、增稠段阻尼系数和引起剪切增稠的临界活塞速度等性能参数,见表 3。

表 3 STF 隔振器性能参数

材料(质量分数)/%	c_1 /(N·s·m ⁻¹)	c_2 /(N·s·m ⁻¹)	v_0 /(m·s ⁻¹)
28	9.42	97.39	0.64
32	31.41	210.49	0.36
35	37.70	452.39	0.168

为研究 STF 隔振器隔振性能,采用数值积分方法对式(6)所示的 STF 隔振系统的非线性动力学响应进行求解。设定隔振器负载为 $m=30$ kg,为使得在振动过程中振幅足够大,剪切速率足以使 STF 隔振器进入剪切增稠阶段,给定激励力幅值为 $f=45$ N。

采用四阶定步长龙哥-库塔(Runge-Kutta)方法求解含有阻尼非线性的动力学方程,积分初始速度和初始位移均设定为 0,每次积分前先判断振动速度是否超过临界活塞速度。表 4 给出了不同质量分数的三种 STF 隔振器共振时的速度幅值,可见速度均大于对应的临界活塞速度,因此隔振器在靠近共振频率时可以进入剪切增稠阶段。

表 4 STF 隔振器参数

材料(质量分数)/%	28	32	35
速度幅值/(m·s ⁻¹)	0.7205	0.3893	0.1848

通过数值仿真解得 STF 隔振系统的位移响应曲线如图 6 所示。图 6 对比了采用不同质量分数的三种 STF 隔振器的位移频响曲线和线性阻尼隔振器的位移频响曲线(线性阻尼隔振器的阻尼为 c_1)。可以看出,由于具有非线性阻尼特性,STF 可以显著降低共振频率附近的振动幅值,同时不对隔振区的减振性能带来不利影响。

3.2 STF 隔振器隔振性能影响因素

图 7 对比了不同质量分数的 STF 隔振器的幅频曲线,可以发现,随着分散相质量分数的增加,STF 隔振器的隔振性能更好。需要说明的是,由于 STF

合成过程中需要通过研磨将分散相充分混合在分散介质中,因此随着分散相质量分数的增加,研磨时间需要增加,STF 合成的难度也将显著增大。

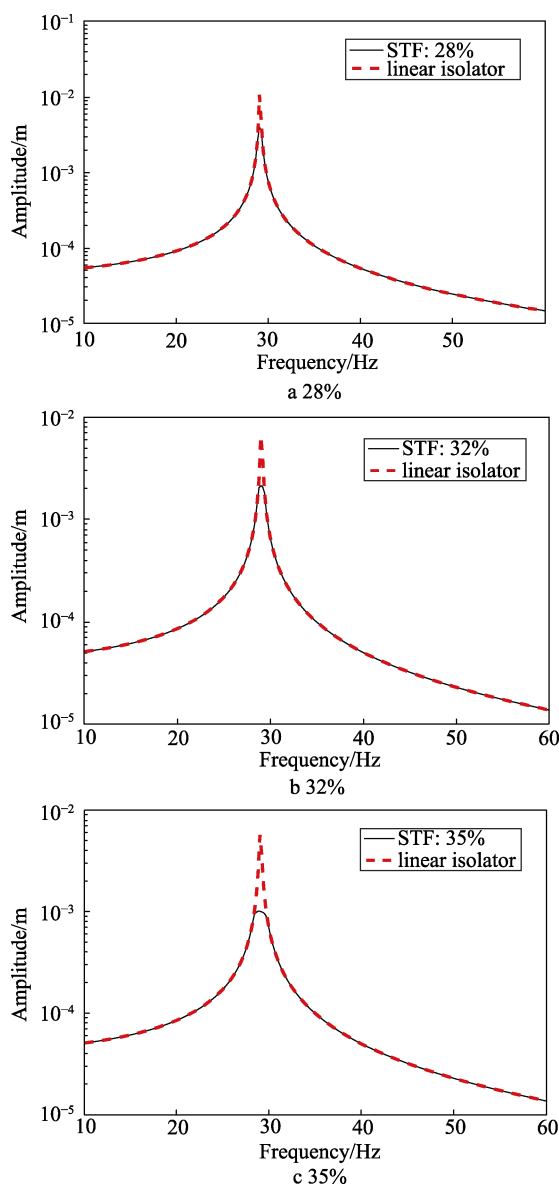


图 6 不同质量分数的减振增稠液体隔振器和线性隔振器频响曲线对比

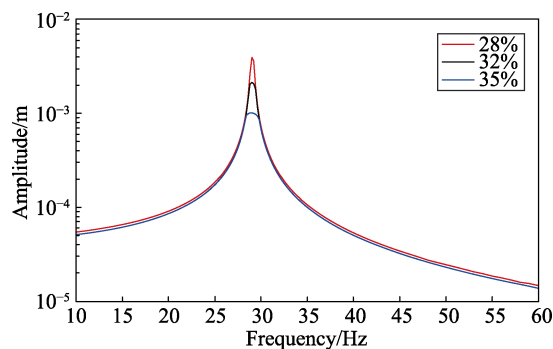


图 7 不同质量分数的 STF 隔振器的幅频曲线
以质量分数 35% 的 STF 为例,在确保结构其他

参数不变的情况下,图 8 给出了活塞半径对隔振性能的影响,其中线性隔振器的阻尼取值为活塞直径 $r=20\text{mm}$ 时剪切变稀段的阻尼系数。共振频率下,不同活塞直径的 STF 隔振器相对于线性阻尼隔振器的隔振性能的对比如图 9 所示。可见,经合理结构设计,STF 隔振器在共振频率附近隔振性能可优于线性阻尼隔振器 20 dB 以上,且随着活塞直径的增加,STF 隔振器的隔振性能更优。这是由于随着活塞直径增加,一方面因为剪切面积增加且活塞和缸体间间隙变小,使得阻尼力变大;另一方面,临界活塞速度降低,剪切增稠现象更容易发生。

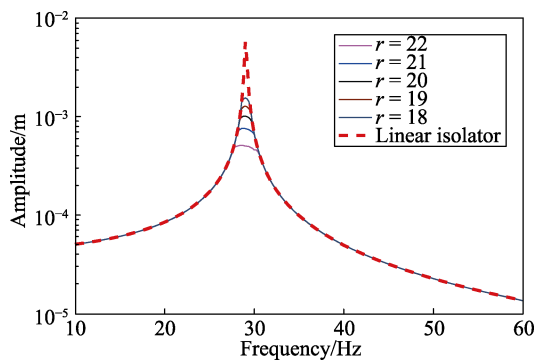


图 8 活塞半径对 STF 隔振性能影响

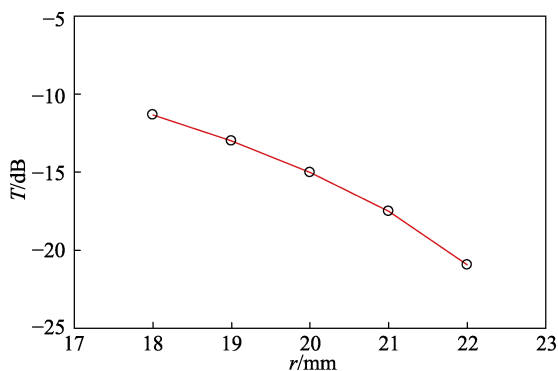


图 9 不同活塞半径隔振效果对比

同样采用质量分数 35% 的 STF 为例,在结构其他参数不变的情况下,图 10 给出了液压缸腔体长度对减振性能的影响,其中线性隔振器的阻尼取值为腔体长度 100 mm 时剪切变稀段的阻尼系数。由图 10 可见,随着液压缸腔体长度增加,减振增稠液体减振性能会有所提升,但是提升效果相对比较有限,同时会导致隔振器体积增大,因此工程中一般不建议采用增加缸体长度方法来提升隔振性能。

4 结语

文中研究了一种具有非线性阻尼特性的隔振器——剪切增稠液体隔振器。当远离共振频率时,隔振器具有小阻尼特性;在共振区附近,由于剪切增稠效应,隔振器阻尼骤然增加,实现对共振峰的有效抑制。

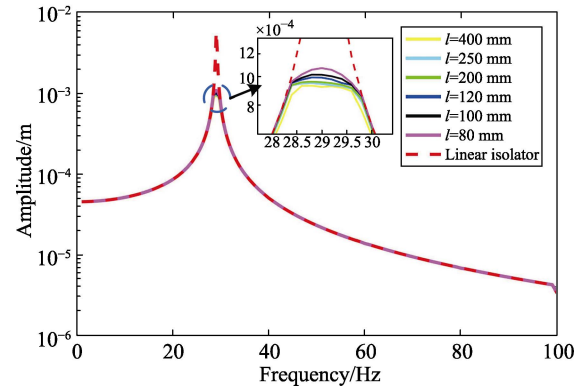


图 10 液压缸腔体长度对 STF 减振性能影响

首先通过实验研究了一类以二氧化硅纳米颗粒和聚乙二醇 200 为工作介质的 STF 的流变特性。之后以 STF 为工作介质,设计了一种活塞液压式减振增稠液体隔振器,并建立了隔振器的动力学模型。通过数值仿真研究了该隔振器的减振性能,发现 STF 可有效抑制共振峰,同时不对高频隔振性能产生不利影响,有效解决了线性阻尼的固有缺点。最后,研究了 STF 隔振器隔振性能影响因素,发现提高分散相质量分数、增大活塞直径和增加液压缸腔体长度均可进一步有效提升 STF 隔振器隔振性能。该研究将为工程中隔振器设计和选用提供新思路。

参考文献:

- [1] 杨礼康,姜少飞,潘双夏,等. 复合结构磁流变减振器设计与特性分析[J]. 农业机械学报, 2006, 37(7): 116-120.
- [2] 陈世崑. 基于磁流变悬置的发动机主动隔振研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2012.
- [3] HO C, LANG Z Q, BILLINGS S A. A Frequency Domain Analysis of the Effects of Nonlinear Damping on the Duffing Equation[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2014, 45(1): 49-67.
- [4] LAALEJ H, LANG Z Q, ZAZAS I, et al. Application of Non-linear Damping to Vibration Isolation: An Experimental Study[J]. Plastic and Reconstructive Surgery, 2006, 117(6): 1992-2000.
- [5] 余慕春, 陈前. 含三次非线性阻尼特性的分子弹簧隔振系统[J]. 振动与冲击, 2017, 36(11): 171-175.
- [6] 李方硕, 周俊辉. 参考模型寻优策略在半主动隔振试验中的应用[J]. 噪声与振动控制, 2017, 37(2): 188-191.
- [7] 李方硕. 双腔液固混合介质隔振器动力学特性及半主动控制研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2016.
- [8] 季馨, 张克仁, 颜肖龙. 无谐振峰隔振缓冲器研究[J]. 机械工程师, 1989(4): 1-3.
- [9] 季馨, 高艳旭. 某歼(强)击机载电子设备隔振系统弹性特性设计[J]. 电子机械工程, 1999, 15(6): 34-37.
- [10] ZHOU H, YAN L, JIANG W, et al. Shear Thickening Fluid-based Energy-free Damper: Design and Dynamic

Characteristics[J]. *Journal of Intelligent Material Systems & Structures*, 2016, 27(2): 238-247.

[11] 徐钰蕾, 龚兴龙, 江万权, 等. 剪切增稠液体的制备及其性能表征[C]// 中国功能材料及其应用学术会议论文集. 武汉: 中国仪器仪表学会, 2007.

[12] 马勇, 陈宏书, 王结良, 等. 基于剪切增稠液体防护装甲的研究[J]. *高分子通报*, 2012(6): 49-53.

[13] 徐素鹏, 郑伟, 张玉芳. 剪切增稠液体增强织物防刺性能的机理研究[J]. *天津工业大学学报*, 2012, 31(3): 15-19.

[14] 蒋玲玲. 剪切增稠液体在柔性防刺材料中的应用研究[D]. 江苏: 江南大学, 2011.

[15] 赵鹏, 余慕春, 陈前, 等. 剪切增稠液体的缓冲机理和力学性能[J]. *振动与冲击*, 2018(6): 966-973.

[16] LIM A S, LOPATNIKOV S L, WAGNER N J, et al. Investigating the Transient Response of a Shear Thickening Fluid Using the Split Hopkinson Pressure Bar Technique[J]. *Rheologica Acta*, 2010, 49(8): 879-890.